

渣油催化裂化提升管反应器性能的数值模拟 ——喷嘴射流速度与角度对流动反应的影响

王洪斌 徐春明

(石油大学重质油加工国家重点实验室, 北京 102200)

摘 要 应用三维数值模拟的研究方法, 考察了喷嘴射流速度与角度对提升管反应器内流动、传热及反应的影响。从数值模拟结果来看, 同一角度下, 一定范围内的射流速度对提升管内流动形态改变不大, 对催化剂和油气浓度分布、气相组成浓度分布有一定影响, 而角度变化对流动、反应都有较大影响。从本研究的范围来看, 可以得出对不同的操作条件和装置存在最优喷嘴射流速度和角度的结论, 射流角度应不超过 45° , 且 45° 时 $60 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的射流速度为优。

关键词 数值模拟 流动反应 射流角度 射流速度 提升管反应器

中图分类号 TQ 021

引言

进料喷嘴是催化裂化提升管反应器的重要构件, 原料油经过喷嘴从边壁以一定角度的高速射流形式进入提升管反应器, 与高温再生催化剂接触换热并迅速气化, 一部分未气化的原料油迅速吸附在催化剂上随催化剂一起流动并不断反应。因此, 油、剂入口的混合区不仅是油气与催化剂混合、气化和开始加速的重要区域, 也是反应的重要初始区域^[1]。由于油气的高速射流作用, 提升管喷嘴附近区域内流动、传热及反应都十分剧烈。在此区中, 为了降低热裂化程度和充分发挥催化剂的固有活性, 就必须提高油气和催化剂的接触效率, 使之充分混合, 使原料均匀分布, 尽量减少返混, 在整个提升管横截面上保持稳定的剂油比, 而原料油气的射流速度和射流角度必然起着关键的作用。

本研究利用石油大学(北京)重质油实验室和清华大学共同开发建立的渣油催化裂化提升管反应器三维气固两相流动、传热及反应的数值模拟程序 NUMOCORR-II^[2], 在原料性质及其他工况参数等条件不变的条件下, 从气固两相流动、接触、混合和反应的机理和本质上, 定量考察了进料喷嘴射流速度和角度对流动、传热及反应的影响。

1 物理模型

NUMOCORR-II 三维气固两相数值模拟程序以 $k-\epsilon-k_p$ 流动传热物理模型^[3]和渣油-回炼油集总动力学模型^[1,2]为基础, 不仅把提升管尺寸、进料喷嘴的结构尺寸和操作工况参数等因素考虑在内, 而且把流动、传热及反应综合考虑, 在三维柱坐标下微分求解, 消除了等温平推流假设下忽略轴向、径向返混回流, 忽略两相之间速度、温度、浓度梯度带来的误差, 所以具有较好的预测性。图1为提升管内流动、传热及反应的物理模型, 它体现了各种

收稿日期: 1998-02-09。

联系人: 徐春明, 第一作者: 王洪斌, 男, 24岁, 硕士。

因素相互耦合的特性。

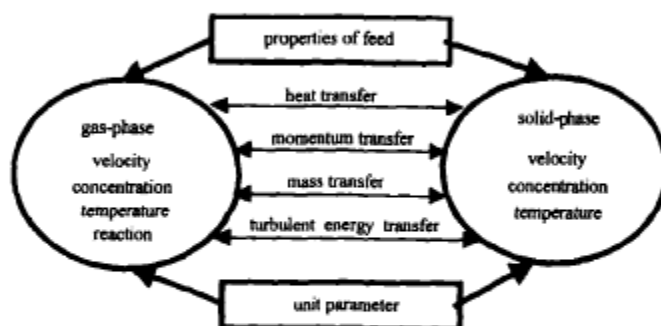


图 1 气固两相流动、传热及反应的物理模型

Fig.1 Physical model of gas - solid two - phase flow, heat transfer and reaction

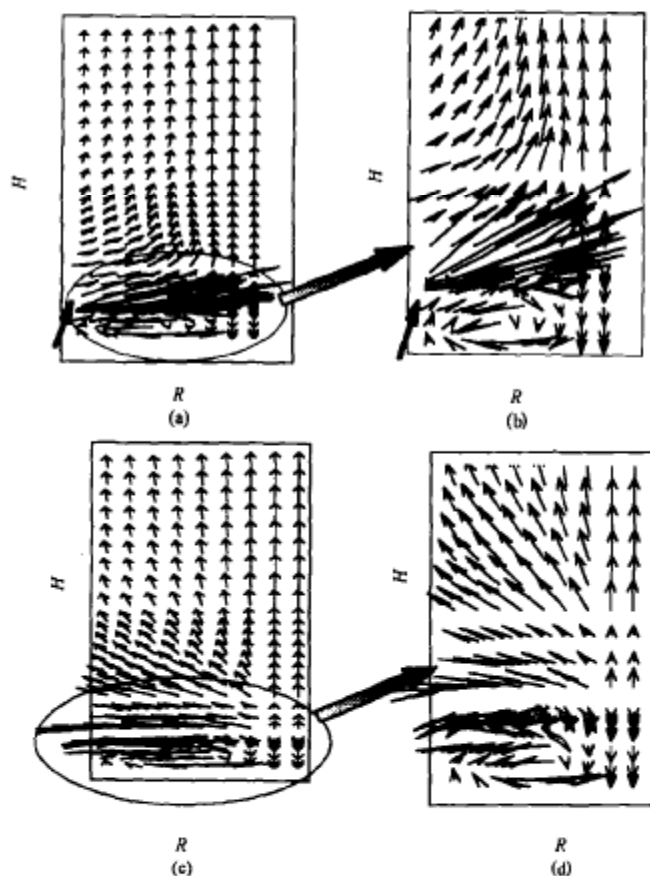


图 2 气相在不同轴截面的速度流场分布

Fig.2 Schematic diagram of flow field of the gas phase at various axial section

(a), (b) — cross feed nozzle; (c), (d) — $-\pi/8$ from feed nozzle

本模型假设原料进入提升管后迅速气化,即以气相进料的形式进入提升管反应器与催化剂接触传热,这一假设与原料油以微小液雾形式进入提升管反应器的实际情况有所差异,但由于本研究模型是在三维坐标下全面考察油气与催化剂的接触状况,无论是液雾还是气体的进料形式都存在相同的高速射流与催化剂的湍流相互作用(图2给出了提升管内轴截面气相流场示意图),所以在其他条件不变的条件下,由此造成的整个提升管内流场、温度场及浓度场的变化趋势是相同的。因此,在一定范围内,本研究的结果对工业实际操作仍具有指导意义。

2 模拟结果

2.1 模拟对象

模型采用的工况参数来自炼油厂详细的标定报告。该重油催化裂化提升管反应器的主要工况操作参数见表1。本文通过三维微分数值模拟的方法分别考察 30° 、 45° 和 60° 的射流角度(与轴线夹角,以下同)下 $60\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $70\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $80\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的射流速度对流动反应的影响,并以此获得进料喷嘴射流速度和角度对流动反应的定量影响。由于进料喷嘴分布具有对称性,因此在实际数值模拟中,为减少计算量和网格划分数量,只选取对称喷嘴所在区域为计算域,例如,对工况3,4个喷嘴呈对称分布,故只取 90° 的扇形区域为计算域。

表1 操作参数
Table 1 Unit parameters

Item	Unit	Item	Unit
length of the riser/m	40	recycled ratio	0.17
inner Diameter/mm	820	catalyst to oil ratio	4.28
number of nozzles	4/symmetry	flux of pre-lift steam/ $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$	0.4166
injecting angle of gaseous		density of the catalyst/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	1650
feed oil(with the axis of the riser reactor)/ $(^\circ)$	45	average diameter of catalyst particle/ μm	65
flux of feed oil/ $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$	21.06	inlet temperature of regenerated catalyst/ $^\circ\text{C}$	703

2.2 数值模拟结果及讨论

2.2.1 射流速度和角度对流场的影响 从图2的轴截面速度矢量流场分布可以看出,在提升管反应器的下部喷嘴区域,与轴线呈一定夹角的高速进料油气与催化剂相互作用,产生了强大的抽引和卷吸,使提升管进料段附近的气固两相出现回流,造成了气固两相返混。图3、图4的横截面流场分布揭示了在提升管下部存在涡流返混现象,这些复杂的流动现象必然对催化剂和反应油气的分布产生重大影响,进而影响催化裂化反应。在本研究考察的工业提升管喷嘴射流速度范围内($60\sim 80\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$),改变射流速度对提升管内流动形态的影响并不十分明显,只是回流和涡流的大小有变化,提升管内气固两相速度有所不同,这说明在通常的工业提升管射流速度范围内,涡流和回流通常是存在的,通过改变射流速度来消除涡流和回流并不可行。

2.2.2 射流速度和角度对温度场的影响 由于进料温度比较低,在喷嘴射流区域气固两相换热后温度有一个突降,在此之后两相温度下降主要是因为裂化反应吸热,曲线斜率变化比较小。图5给出了相同射流速度下提升管内横截面气相平均温度沿提升管高度的分布,由图

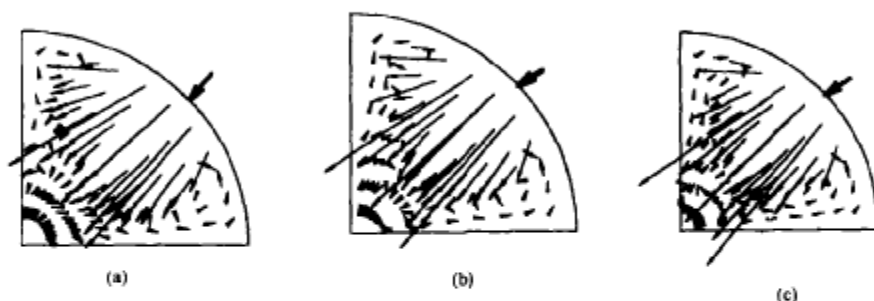
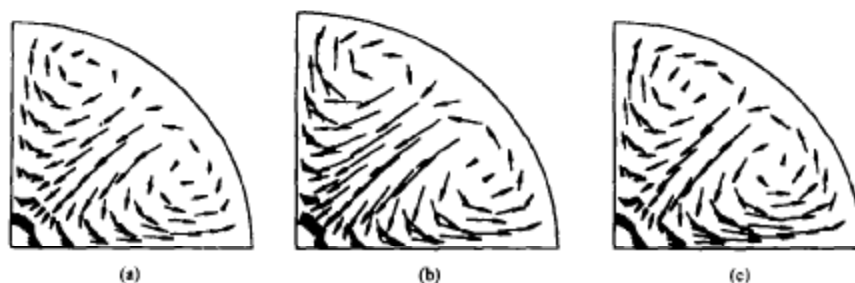
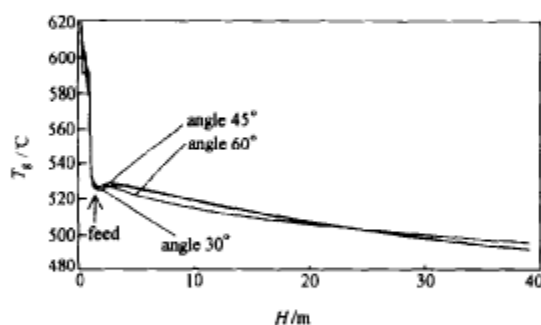
图 3 横截面气相流场(横向喷嘴, 喷射角 30°)Fig.3 Flow field of the gas phase at cross-section (cross feed nozzle, injecting angle 30°)injecting velocity of feed oil/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$: (a) —60; (b) —70; (c) —80图 4 横截面气相流场(喷嘴 0.6 m 上, 喷射速度 $70 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)

Fig.4 Flow field of the gas phase at cross-section (0.6m

above feed nozzle, injecting velocity $70 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)injecting angle of feed oil: (a) — 30° ; (b) — 45° ; (c) — 60°

看出, 除在喷嘴附近略有不同外(45° 混合温度稍高), 30° 和 45° 的曲线基本重合, 而夹角为 60° 时与 30° 和 45° 大不相同, 它在喷嘴处的温度突降后没有明显的一个回升, 而且在中下部的温度比较低, 而提升管上部温度又高于 30° 和 45° . 这一差异也可以从表 2 中 60° 与 30° 、 45° 的不同得到体现. 分析原因主要是因为与轴线夹角为 60° 时, 径向的速度分量比较大, 造成横截面上两相湍流相互作用尤为突出, 与催化剂接触碰撞比较剧烈, 湍流换热程度高, 换热速度快, 低温进料的影响范围就要小, 而且催化剂与油气的碰撞接触几率也大大增加, 反应速度提高, 因此两相温度在此区迅速下降, 形成中下段的温度比 30° 、 45° 低的现象. 同时湍流程度的增加造成了油气和催化剂分布

图 5 提升管内气相平均温度沿提升管高度分布
(射流速度 $70 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)Fig.5 Temperature distribution of gas phase along the riser reactor height (velocity of $70 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)

不均匀,使之在提升管上部反应速度降低,反应吸热少,裂化反应程度低,造成上部温度反而高。而 30°和 45°时径向速度增加带来的油气混合的不均匀性与碰撞几率的增加相抵销,因此 30°和 45°时温度与组成分布的差异并不十分明显。

2.2.3 射流速度和角度(与轴线夹角)对反应组成分布的影响 虽然从流场、温度场的分布形态来看,工业提升管范围内的射流速度对它们影响并不明显,但射流速度和角度对催化剂和气相各组成的分布却产生了一定的影响。对催化裂化反应,催化剂浓度与气相浓度乘积是催化反应的关键因素,图 6 反映了流动对催化剂和气相浓度分布的影响,图 7、图 8 则直接反映了流动对催化裂化反应产物的影响,图 6 中 3 种情况下两相浓度乘积分布各不相同,必然造成图 7、图 8 中组成分布的不同。相比之下,图 6 中射流角度为 30°下两相浓度乘积的分布更为均匀些,45°和 60°时的变化起伏稍大。

表 2 不同射流速度和角度对产物组成的影响

Table 2 Influence to the outlet composition of various feed velocities and angles

Angle	Velocity /m·s ⁻¹	Recycled oil(W) /%	Diesel oil(W) /%	Gasoline(W) /%	Gas(W) /%	Coke(W) /%	Diesel oil and Gasoline(W) /%	Gas and coke(W) /%
30°	60	17.04	16.74	36.44	14.45	6.84	53.18	21.29
	70	16.75	16.89	36.29	14.51	7.16	53.18	21.67
	80	17.07	16.70	36.59	14.33	6.81	53.29	21.32
45°	60	17.41	17.03	36.13	14.12	6.57	53.16	20.69
	70	16.78	16.86	36.28	14.50	7.17	53.14	21.67
	80	17.00	16.74	36.36	14.49	6.85	53.10	21.34
60°	60	18.16	16.32	35.66	14.76	6.15	51.98	20.91
	70	18.15	15.97	35.71	15.12	6.33	51.68	21.45
	80	18.15	16.06	35.92	14.87	6.28	51.98	21.15

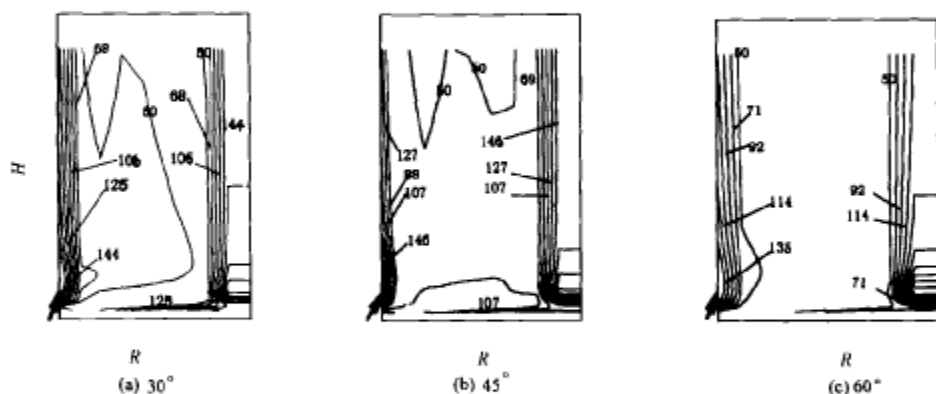


图 6 不同喷射角度下轴截面上催化剂浓度(kg·m⁻³)与气相质量分率的乘积分布图

Fig.6 Contour diagram of the product of gas and catalyst concentration at axial section (cross feed section) of various injecting angle (velocity 70 m·s⁻¹)

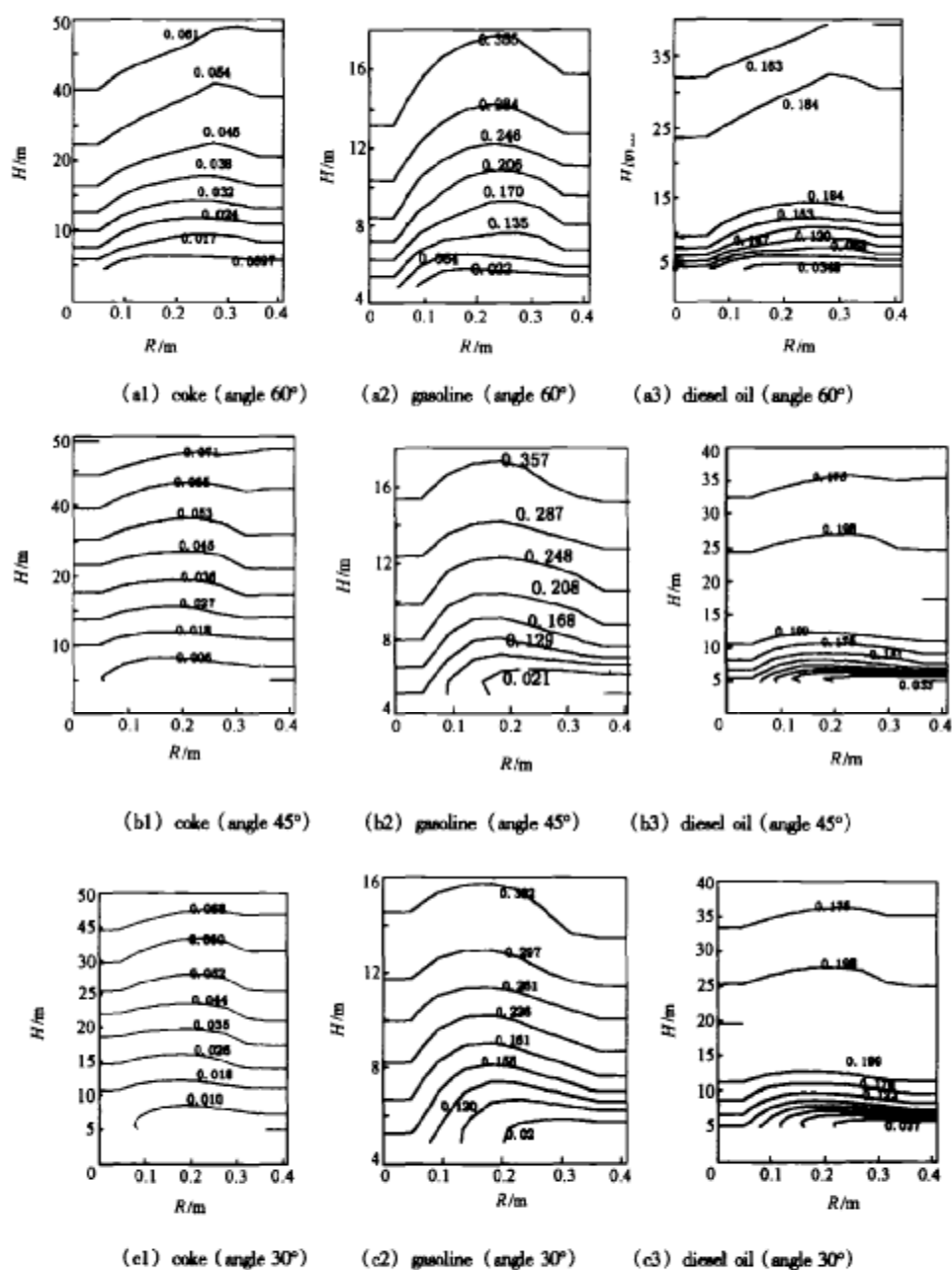
图 7 提升管内产物质量分率分布图(射流速度 $70 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)Fig. 7 Contour diagram of product yield distribution in riser reactor
($70 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ injecting velocity)

表 2 给出了不同射流速度和角度下, 数值模拟得到的提升管反应器出口组分质量分率的数据, 图中各组成成为提升管内包括回炼油和水蒸气在内的真实质量分率, 从中可以看出如下几点.

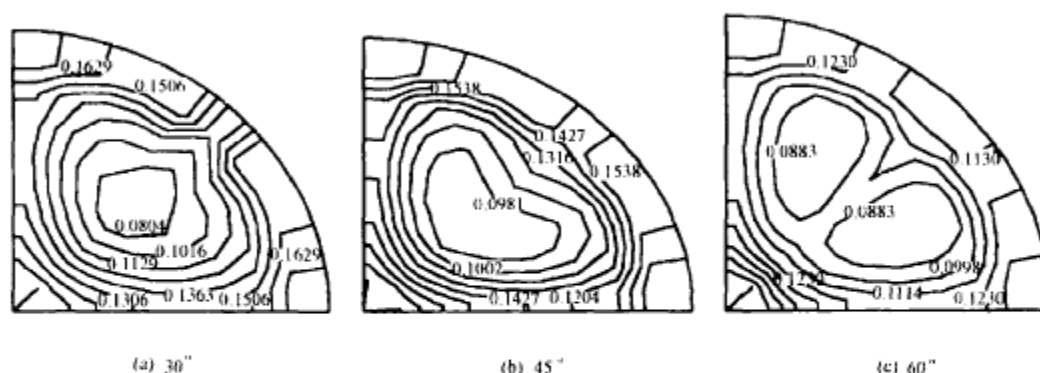


图 8 不同射流角度下横截面气流质量分率图

Fig.8 Contour diagram of gasoline fraction at cross-section of various injecting angles (0.6 m above feed nozzle)

(1) 喷嘴与轴线夹角为 60° 时, 不管在哪种射流速度下, 无论是柴油、汽油还是轻质油总收率都比 30° 和 45° 时小很多, 这是因为夹角为 60° 时, 轴线速度分量太小, 而径向速度分量比较大, 造成了气固两相在径向有较大湍流流动相互作用, 从而使催化剂和油气分布不均匀, 而且反应温度偏低造成了反应转化率低, 这一点也验证了图 5、图 7, 图 8 中 60° 与 30° 、 45° 的差异。

(2) 在 45° 和 30° 的射流速度时, 柴油、汽油和轻质油总收率相差并不很大, 焦炭和气体的产率变化也不明显。从多产汽油的角度来看, 相同的射流速度下 30° 略优一些, 而其轻质油总收率也略大一些。从总的轻质油收率和减少气体焦炭产率的角度来看, 45° 时 $60 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的射流速度为优。

(3) 在 45° 或 30° 时, $70 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 射流速度下的柴油收率较高, 而汽油的收率在 $80 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时最大; 在 $70 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时提升管出口处反应形成的新回炼油量最少, 这说明裂化反应的总转化率较高, 随之而来的是焦炭、气体的产量也比 $60 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $80 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时增大; $60 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时焦炭和气体总产率最小。

总之, 对渣油催化裂化反应, 提升管下部是流动反应的主要区域, 由于气固两相之间在提升管下部存在强烈的湍流相互作用, 而湍流相互作用又决定了提升管下部催化剂和油气的分布状况, 因此在提升管中, 同样的操作工况下, 要得到最大的汽油、柴油和轻质油收率, 并不是射流速度和轴向速度越大越好(以此来缩短反应时间, 减少二次反应发生), 而是存在着最优的喷嘴射流速度和角度。

3 结论

(1) 从本研究范围来看, 同一角度下, 射流速度对流动形态影响并不明显, 但对温度和浓度分布产生了一定影响, 而射流角度对流动反应都有较明显的影响, 这是因为射流角度的改变直接改变了轴向和径向的速度分布。

(2) 本研究的结果表明: 射流角度以不超过 45° 为优; 而且综合考虑 45° 时 $60 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的射流速度为最优。

符 号 说 明

 H ——提升管高度, m k ——气相湍动能, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ k_p ——颗粒相湍动能, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ R ——提升径向长度, m T_g ——气相温度, $^{\circ}\text{C}$ ϵ ——气相湍动能耗散率, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$

参 考 文 献

- 1 陈俊武, 曹汉昌主编. 催化裂化工艺与工程. 北京: 中国石化出版社, 1995. 847
- 2 徐春明. 化工学报, 1999, 50(1): 57
- 3 Yincheng Guo. Numerical Simulation of Gas - Particle Flows in a Fluid Catalytic Cracking Riser. International Symposium on Multi-phase Fluid, Non - newtonian Fluid, and Physico - chemical Fluid Flows' 97 Beijing, 1997. 10

NUMERICAL SIMULATION OF THE INFLUENCE OF INJECTING VELOCITY AND ANGLE ON FLOW AND REACTION IN RFCC RISER REACTOR

Wang Hongbin and Xu Chunming

(State Key Laboratory of Heavy Oil Processing, University of Petroleum, Beijing 102200)

Abstract The influence of feed injection velocity and angle on flow and reaction in a RFCC riser reactor was examined by using the three - dimensional differential numerical simulation method. The results showed that injecting velocity had a little influence on the form of flow field, but had influence on the distribution of catalyst and gas - phase concentration. The variation of injecting angle (with the axis of the riser) had a relatively greater influence on both flow field and reaction results. For the scope of the said research, the existence of an optimum injecting velocity and angle in riser could be established. The optimum injecting velocity was $60 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ of the angle 45° , and the optimum injecting angle should be no more than 45° .

Keywords numerical simulation, flow reaction, injecting angle, injecting velocity, riser reactor